干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

黄土丘陵沟壑区不同深度土壤水分对降雨的响应及其稳定性

姚雪玲[1]， 杨国靖[2]， 王 帅[3]， 郭秀江[4]

（1. 中国林业科学研究院荒漠化所，北京 100091；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室，甘肃 兰州 730000；3. 北京师范大学地理科学学部，北京 100875；4. 华北油田技术监督检验处计量中心站，河北 任丘 062552）

摘 要：通过采用点面结合的方法，分析黄土高原地区降雨影响下不同深度土壤水分的时空变化，从土壤水分复杂的“变异性”中提取相对的“不变性”。结果表明：20 cm以上土壤水分无明显规律，难以表征不同植被类型或空间位置上的土壤水分差异；小于30 mm的降雨基本不会引起40 cm以下土壤水分明显波动；100 cm深处，各采样点的土壤水分能在一个稳定值上保持数月时间，在大于46 mm的强降雨之后出现阶梯式抬升，之后又保持稳定状态；越往土层深处，土壤水分时空稳定性越明显，能较好的表征各植被类型或空间位置上的土壤水分差异。该研究从土壤水分的稳定性角度进行分析，对黄土高原土壤水分的地面采样设计和时空预测具有实际应用价值。

关 键 词：土壤水分；稳定性；降雨；黄土高原

文章编号：

土壤水分时空格局是生态水文模拟研究的基础[1-2]。所有关于土壤水分格局的研究，都是基于土壤水分具有一定稳定性的假设上，否则得出来的规律都只是“瞬时”的[3-4]。早在1985年，Vachaud等[5]就指出土壤水在空间上的变化特性在很大程度上可以用土壤结构的变化特性来解释，空间上的某个点在某一时间的含水量很高，那么它就有很可能在另一时间也保持着很高的含水量，这种现象被称为时间的稳定性。朱首军等[6]对淳化县地埂花椒-小麦-苹果复合模式的试验地2 m深的土壤水分进行连续观测，发现无论哪个观测点，尽管不同时间段的含水量不同，但是总体趋势却是基本一致的，大者仍大，小者仍小。周启友等[7]通过电阻率成像法获取三维空间上土壤含水量在降雨前后的变化，发现降雨使土壤整体含水量增加，但是其空间分布结构和模式并没有发生根本变化，随着降雨停止，土壤逐渐干燥，土壤含水量的空间分布结构几乎完全返回到了降雨前的模式。在半干旱黄土高原地区，沟壑纵横的地形和小斑块状的土地利用方式使得其土壤水分的时空变化尤其复杂[8-9]。在土壤水分获取手段上，目前遥感技术只能获取近地表的土壤含水量，远不能满足关于深层土壤水资源及植物生长等相关的研究需要，因此通过仪器以及人工钻取土样测定深层含水量的方法仍普遍使用[10-12]。在地面测定土壤水分时，高频次的时间序列数据通过定点安装土壤水分监测仪来获取，而大范围的土壤水分数据通过定期空间采样获取，土壤水分数据的高频次和大范围往往很难同时满足，大量的重复观测又会耗费较多人力物力[13]。以往的相关研究多注重分析土壤水分的变化特性，本文注重从土壤水分复杂的“变异性”中提取相对的“不变性”，既有助于我们从另一个角度认识黄土高原的土壤水分规律，也对简化土壤水分地面测定具有一定的实际意义，同时也为黄土高原地区的水文模拟预测提供参考。

收稿日期：2019-06-11； **修订日期**：2019-11-26

基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFC0500806）；国家自然科学基金项目（41671187）资助

作者简介：姚雪玲（1981-），女，博士，研究方向为半干旱区草地生态恢复. E-mail: yaoxueling@126.com

通讯作者：杨国靖（1975-），女，博士，研究方向为寒旱区景观格局变化. E-mail: yangguojing@lzb.ac.cn

1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市以北的羊圈沟小流域,属典型黄土丘陵沟壑区(图1)。小流域面积约2 km²,半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量535 mm,降水多集中在7—9月,占年降水量60%以上,且多暴雨。流域内土壤以黄绵土为主,抗蚀性差,水土流失严重。流域内自然植被破坏殆尽,垦殖指数较高,土地利用以坡耕地、梯田农地、果园、草地、人工沙棘林和人工刺槐林为主[14]。

2 实验方案

本研究通过仪器长期监测5个点来研究土壤水分在降雨影响下的时间变化。通过空间样带的定期采样研究土壤水分的空间格局的变化。

选取5种典型土地利用类型样地(表1),每个样地安装一台土壤水分监测仪(H21土壤水温监测系统),在10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm和100 cm埋设土壤水分传感器,每10 min记录一次土壤含水量。小流域安装有雨量计,同步监测降雨量。5个样地坡度大约在20°,坡向为西。监测点位置见图1,监测点植被状况:(1) 人工乔木林树木间距是2.5 m×3.0 m,为单一刺槐(*Robinia pseudoacacia*)树种。(2) 天然灌木林内生长有密集的土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*),伴有零星几棵刺槐。(3) 草地1样地内优势种为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*),裸地和铁杆蒿草丛呈镶嵌斑块分布。(4) 草地2样地内优

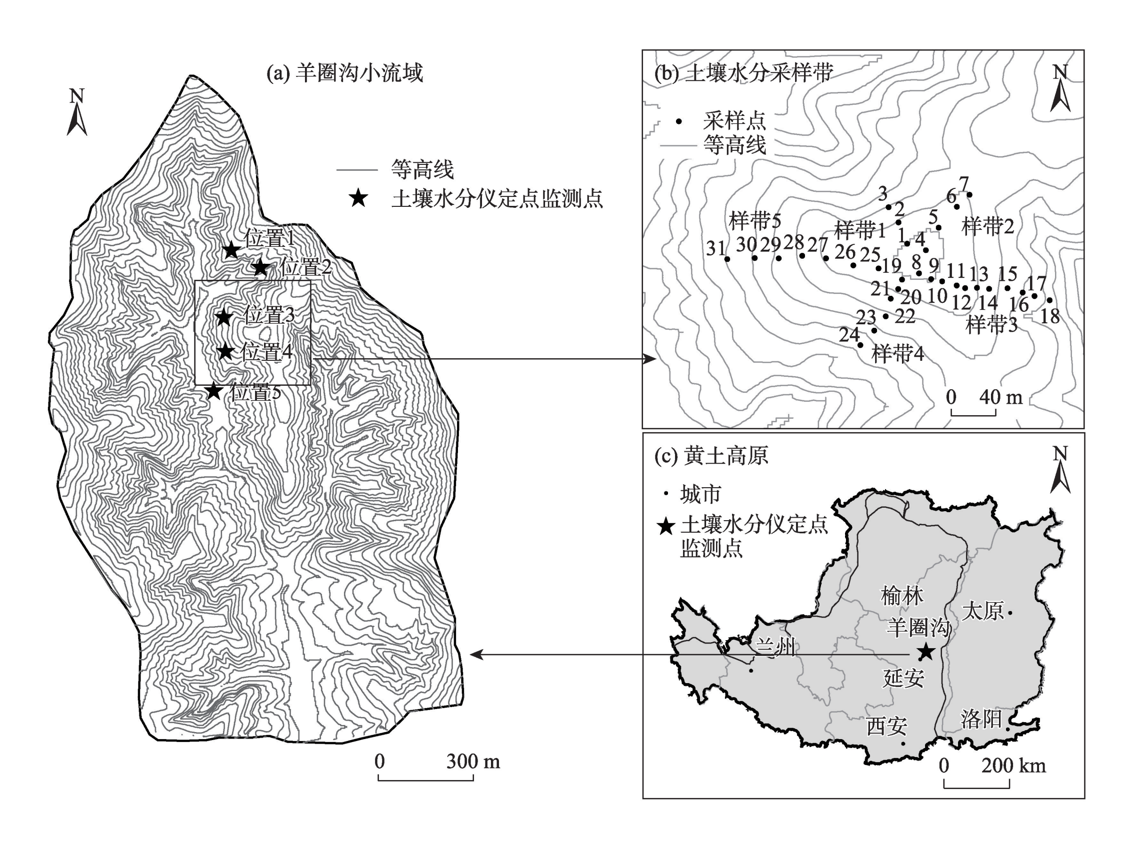


图1 土壤水分监测点及样带位置

Fig. 1 Location of soil moisture observation sites and sampling transects

表1 5个监测样地的植被和土壤信息

Tab. 1 Vegetation and soil characteristics of the observed sites

监测点编号	植被类型	优势种	覆盖度/%	高度/m	土壤容重/g·cm^{-3}	退耕/种植年限/a
1	人工乔木	刺槐(*Robinia pseudoacacia*)	40	3.5	1.36	30
2	天然灌木	土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)	90	1.5	1.22	30
3	草地1	铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)	75	0.5	1.25	20
4	草地2	白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)	80	0.4	1.29	10
5	农田	玉米(*Zea mays*)	95	2.2	1.40	>50

势种是白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)。两块草地都是退耕后自然演替的结果。(5) 农田分布在沟底的坝地，种植有玉米(*Zea mays*)。研究分析采用雨季6—9月之间的数据，这段时期降雨量占全年70%以上，是土壤水分变化最多的一段时期。其中，刺槐林和玉米地因土壤水分监测仪器故障，数据有中断，但在数据正常获取期间有多次降雨发生，仍可观察到土壤水分随降雨的变化，故对此数据予以保留。

对土壤水分的空间格局稳定性研究，我们选取小流域内一座典型梁卯，从山顶向山下沿不同方向程辐射状布设5条样带(图1、表2)。在每条样带上，每间隔20 m测定土壤水分，每个测定点重复测定3个1 m深钻孔，通过称重法分别测定不同深度的土壤含水量，同步测定土壤容重，换算成体积含水量。采样在雨季初期和末期各进行一次。

3 结果与分析

3.1 降雨影响下土壤水分的时间变化

研究的雨季期间共发生11场明显降雨，依次用字母A~K标识。对各场降雨的雨强和雨量进行统计，并统计是否引起土壤含水量的变化(表3)。从统计结果来看，10~20 cm土层几乎对11场降水均有响应，各场降雨之后土壤水分都有明显的增加，随后在蒸散发的作用下，土壤水分缓慢减少，直到下一场降雨发生。另外，农、林、草样地土壤含水量的相对大小会有交叉变化(图2)，因此可以认为，在气象因子的影响下，20 cm以上的土壤水分无论在时间上还是在空间上都不稳定。

40~80 cm土层中，土壤水分对降雨事件的响应骤然减少，仅E、F、H、J等4场降雨(降雨量大于30 mm)引起明显的土壤水分递增。农、林、草之间的土壤含水量出现明显分异，而且在整个雨季，尽管有多次高强度降雨，土壤含水量农>草>林的规律一直保持不变。随着深度增加，农、林、草土壤含水量的相对大小呈现出愈加明显稳定性。黄土高原土壤水分能在40 cm以下保持明显稳定性在相关研究中也得到证实[15-16]。

在100 cm处，土壤含水量的稳定特征更加突

表2 实验样带的基本信息

Tab. 2 General information of the sampling transects

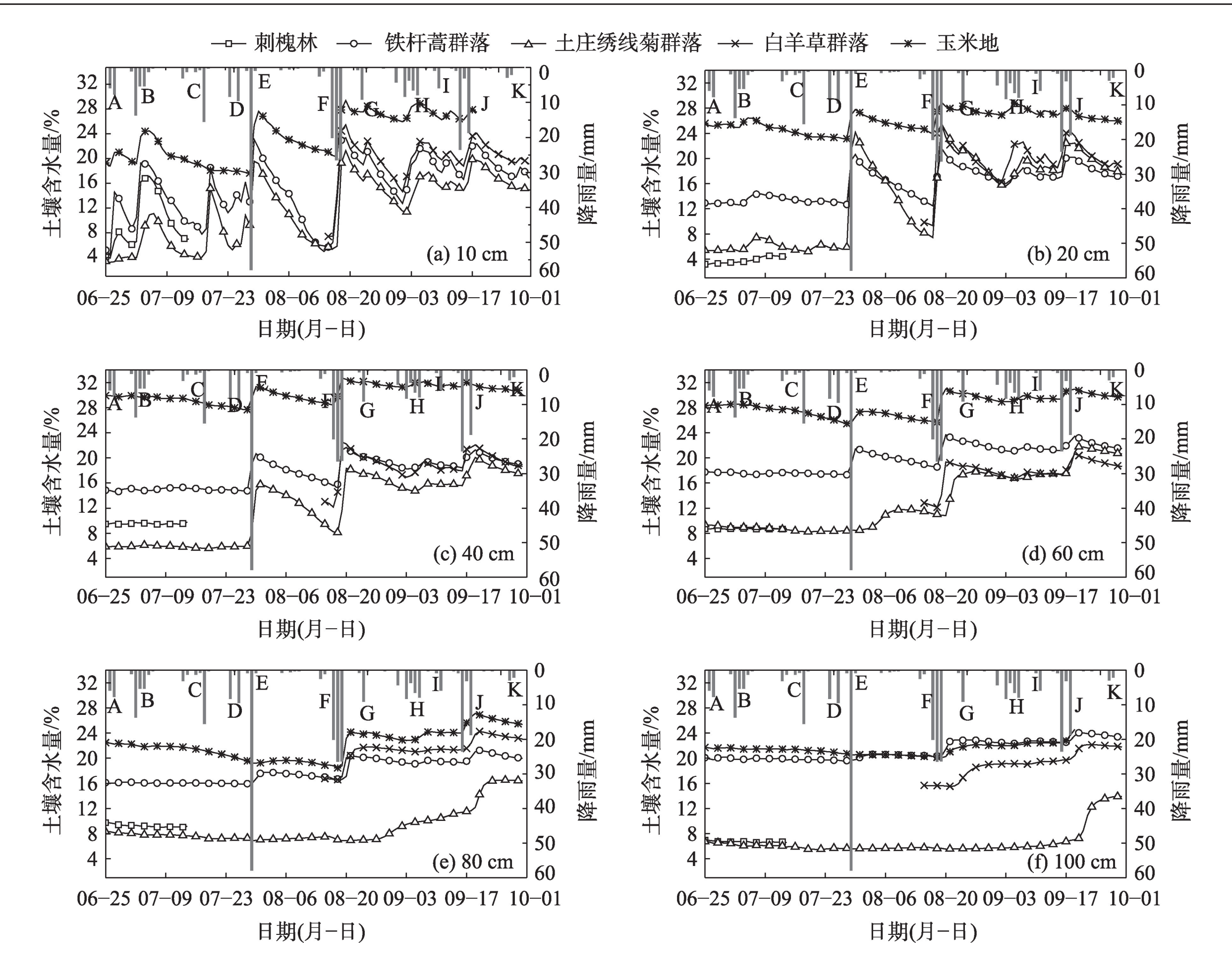
样带编号	方位	植被类型	坡度/(°)	小地形	退耕年限/a	林冠郁闭度/%	地表覆盖度/%
1	北	上坡位-沙棘林	22	平直坡	8	95	100
		中坡位-刺槐林	22	平直坡	28	50	95
2	东北	沙棘林	8	平直坡	8	95	100
3	东	上坡位-刺槐林	18	隔阶坡面	8	30	30
		中坡位-荒草地	18	平直坡	10	-	30
4	南偏西	上坡位-山杏林	19	隔阶坡面	7	40	70
		中坡位-荒草地	19	隔阶坡面	7	-	70
5	西	上坡位-荒草地	21	平直坡	20	-	80
		中坡位-刺槐林	22	平直坡	20	30	80

表3 不同深度土壤含水量对降雨的响应

Tab. 3 Response of soil moisture at different depths to rainfall events

降雨场次编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
降雨量/mm	13.4	25.0	21.4	17.8	57.8	76.0	9.8	30.2	6.6	46.0	4.8
雨强/mm·h^{-1}	0.3	0.3	0.6	0.2	2.4	1.0	0.4	0.3	0.2	0.6	0.1
10 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
20 cm	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√
40 cm					√	√		√		√	
60 cm					√	√		√		√	
80 cm					√	√		√		√	
100 cm					√	√				√	

注：√表示土壤水分对降雨有明显响应；字母A~K表示该雨季依次发生的11场降雨。



注:字母A~K表示该雨季依次发生的11场降雨。

图2　5个样地不同深度土壤水分的时间变化

Fig. 2　Changes of soil moisture in the five sites during the rainy season at different depths

出,其中土庄绣线菊样地仅在9月16—18日降雨(46 mm)后出现过一次明显波动。农田土壤含水量分别在8月18—20日的降雨(76 mm)、9月16—18日的两场降雨(46 mm)后出现增加。白羊草草地除了对这两场降雨产生响应外,在7月29日的一场暴雨(58 mm)后,也有所增加。值得注意的是,若无大雨或者连续性降雨发生,各样地100 cm深处的土壤含水量能一直保持平稳状态,即使受到降雨补充后,土壤含水量呈台阶式递增,增加后的土壤水分也能在一定时期内保持平稳。

3.2　降雨影响下土壤水分的空间变化

图3横坐标的采样点编号与图1中相对应,代表不同的采样位置,纵坐标为雨季前后的土壤含水量。从图3可以初步看到,不同位置的土壤含水量,在雨季前后表现出一定的波动一致性,高处仍高,低处仍低。对各土层雨季前后的土壤含水量做了Pearson相关分析,相关系数从20 cm到100 cm分别为0.64,0.70,0.83,0.89,0.88,均达到显著相关($P<0.01$)。进一步证实了土壤含水量在空间分布上能保持较好的稳定性,并且随着土层深度增加,这种空间格局的稳定性来越明显。

4　讨论与结论

20 cm以上土层中土壤含水量对气象因子的响应敏感,土壤水分在降雨-蒸散发的影响下频繁波动,不同样地土壤含水量的相对大小也容易出现变化,时空稳定性差。因此对20 cm以上的土壤水分进行采样很难代表其长期状况,也不宜对不同空间位置或不同植被类型的土壤水分进行对比。因此,遥感获取的表层土壤含水量仅可用于大尺度的土壤水分研究,在对黄土高原小斑块状土地利用方式下的土壤水分进行对比时应慎用。

40~80 cm土层的土壤含水量受到降雨的影响

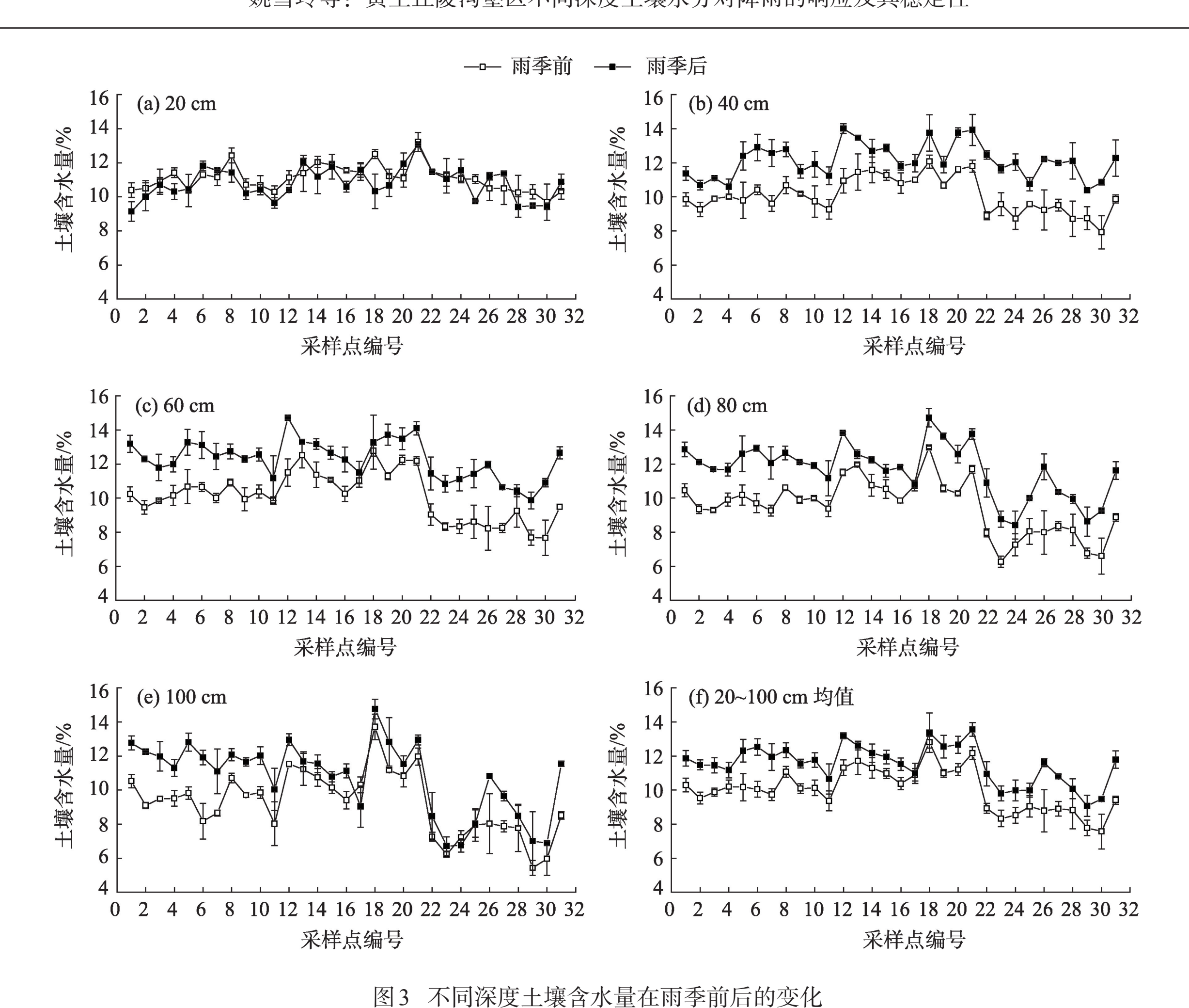


图3　不同深度土壤含水量在雨季前后的变化

Fig. 3　Changes of soil moisture before and after the rainy season at different depths

逐渐减少，雨季中仅4场大于30 mm的降雨引起明显的土壤水分变化，不同植被类型的土壤含水量相对大小趋于稳定，随着深度的增加，土壤含水量的时空稳定性更加明显，这与已有研究结论一致[17-19]。到100 cm深处，雨季中只有1~3场降雨（降雨量大于46 mm）引起各样地土壤含水量的明显变动，而且每次变动后，土壤含水量在一个新的状态下在能较长时期保持稳定，直到下一场降雨事件发生。因此，40 cm深度以下的土壤水分能比较稳定地表征不同植被类型以及不同空间位置上的土壤水分相对大小。例如，6月测定土壤含水量（40~100 cm）农田>草地>灌木林地，这种次序一直保持到8月，直到强降雨事件的发生才有可能改变这个次序，这些规律在很多研究中也有证实。因此，若用人工测样法调查不同土地利用类型或空间位置的土壤水分差异，务必要深层取样才能得出稳定可靠的结果。

对5个坡面31个空间样点的土壤含水量在雨季前后进行比较发现，雨季前土壤含水量处于高位的样点，其雨季后土壤含水量仍处于高位，如18、21、31号样点。雨季前处于低含水量的样点，雨季后仍处于低位，如11、23、29号样点。土壤水分这种高处仍高，低处仍低的空间稳定性在80 cm以下表现的尤为明显，这对土壤水分的空间预测具有一定参考意义。

国外关于土壤水分时空稳定性的研究，是在小流域内大面积安装若干土壤水分监测设备，将各个监测点的土壤水分进行排序并与流域均值做比较，找出最能稳定表征流域均值的监测点[20]。在国内，Li等[17]在黄土高原一坡面上安置了135个中子管测定点，采用上述排序法监测坡面上的土壤水分变化及其稳定性，然而此种方法成本较高，研究的空间范围也受限制，难以在国内普及。目前国内对土壤水分调查，在大空间尺度上，仍然普遍采用人工土钻法定期进行测定[2,12,15,21]。由于人工土钻采样频率受到限制，不易获得高频次长时间序列的土壤水分数据，并且野外取样的时间节点随机性较强。本研

究关于土壤水分时空稳定的探讨,有利于简化或合理安排人工采样时间节点。例如,在没有持续性强降雨发生情况下,100 cm深处的土壤水分能在一个稳定状态保持数月时间,据此,在实际采样中,100 cm以下土壤含水量的测定频率可缩减至数月一次。该研究为黄土高原广泛应用的人工间歇式土壤水分取样方法的合理性提供了一定的科学依据。

参考文献(References)

[1] Korresa W, Reichenaua T G, Fiener P, et al. Spatio-temporal soil moisture patterns: A meta-analysis using plot to catchment scale data[J]. Journal of Hydrology, 2015, 520: 326-341.

[2] 李剑, 赵忠, 袁志发, 等. 黄土高原刺槐林地土壤水分垂直分布特征及其动态模型的建立[J]. 西北植物学报, 2014, 34(8): 1666-1675. [Li Jian, Zhao Zhong, Yuan Zhifa, et al. Dynamic model of soil moisture of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(8): 1666-1675.]

[3] Vanderlinden K, Vereecken H, Hardelauf H, et al. Temporal stability of soil water contents: A review of data and analyses[J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(4), doi: 10.2136/vzj2011.0178.

[4] Gao L, Shao M A, Peng X H, et al. Spatio-temporal variability and temporal stability of water contents distributed within soil profiles at a hillslope scale[J]. Catena, 2015, 132: 29-36.

[5] Vachaud G, Desilans A P, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil-water probability density-function[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822-828.

[6] 朱首军, 丁艳芳, 薛泰谦. 农林复合生态系统土壤水分空间变异性和时间稳定性研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 46-48. [Zhu Shoujun, Ding Yanfang, Xue Taiqian. Study on spatial variability and temporal stability of soil moisture in agri-forestry[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(1): 46-48.]

[7] 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 683-689. [Zhou Qiyou, Dao Tianchun. Temporal stability of spatial distribution structure of soil moisture[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(5): 683-689.]

[8] Yao X L, Fu B J, Lyu Y H, et al. The multi-scale spatial variance of soil moisture in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 5(12): 694-703.

[9] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J]. Catena, 2014, 115: 123-133.

[10] 蔡亮红, 丁建丽. 基于改进植被指数土壤水分遥感反演[J]. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1248-1255. [Cai Lianghong, Ding Jianli. Remote sensing inversion of soil moisture based on modified vegetation index[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(6): 1248-1255.]

[11] 武彬, 张清, 李希灿, 等. VIIRS-TVDI法反演干旱区农田土壤湿度[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1327-1333. [Wu Bin, Zhang Qing, Li Xican, et al. Evaluating soil moisture of prime farmland using the VIIRS-TVDI in arid land[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1327-1333.]

[12] 王顺利, 王荣新, 敬文茂, 等. 祁连山干旱山地草地生物量对水分条件的响应[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 772-779. [Wang Shunli, Wang Rongxin, Jing Wenmao, et al. Biomass of grassland and response to soil moisture on arid mountain land in the Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 772-779.]

[13] 陈玫妃, 曾辉, 王钧. 青藏高原高寒草地土壤水分生态特征研究现状[J]. 中国草地学报, 2015(2): 94-101. [Chen Meifei, Zeng Hui, Wang Jun. Research progress in the ecological characteristics of soil water in alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015(2): 94-101.]

[14] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968. [Yao Xueling, Fu Bojie, Lyu Yihe. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 4961-4968.]

[15] 贺美娜, 童永平, 王云强, 等. 黄土区坡面尺度微地形和次降雨对5 m土壤水分影响的典型个例分析[J]. 地球环境学报, 2017, 8(4): 357-366. [He Meina, Dong Yongping, Wang Yunqiang, et al. A case study on the effects of micro-topography and rainfall events on 5 m soil moisture at a slope of the Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2017, 8(4): 357-366.]

[16] Gao L , Shao M A. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers[J]. Catena, 2012, 95: 24-32.

[17] Li X Z, Shao M A, Jia X X, et al. Profile distribution of soil-water content and its temporal stability along a 1340 m long transect on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 137: 77-86.

[18] He Z B, Zhao M M, Zhu X, et al. Temporal stability of soil water storage in multiple soil layers in high-elevation forests[J]. Journal of Hydrology, 2019, 569: 532-545.

[19] 韩姣姣, 段旭, 赵洋毅. 金沙江干热河谷不同植被坡面土壤水分时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 121-129. [Han Jiaojiao, Duan Xu, Zhao Yangyi. Spatial and temporal variability of soil moisture on slope land of different vegetation of dry-hot valley in Jinsha River[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 121-129.]

[20] Martínez-Fernández J, Ceballos A. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1647-1656.

[21] 王云强, 邵明安, 胡伟, 等. 黄土高原关键带土壤水分空间分异特征[J]. 地球与环境, 2016, 44(4): 391-397. [Wang Yunqiang, Shao Ming'an, Hu Wei, et al. Spatial variations of soil water content in the critical zone of the Chinese Loess Plateau [J]. Earth and Environment, 2016, 44(4): 391-397.]

Soil moisture response and stability to rainfall in different depths in Loess Plateau

YAO Xueling[1], YANG Guojing[2], WANG Shuai[3], GUO Xiujiang[4]

（1. Research Institute of Desertification, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Technical Supervision Department of Huabei Oilfield, Metrology Center Station, Renqiu 062552, Hebei, China）

Abstract: The soil in the Loess Plateau, China is deep and contains abundant soil water resources. However, the terrain is complex, and small land patches are used in this area. Therefore, the temporal and spatial changes of soil moisture are extremely complicated. Previous studies have concentrated more on the soil moisture’s variation characteristics. This study extracts invariance from its variability and explores soil moisture stability characteristics to provide a scientific basis for ground-sampling design and soil moisture prediction in the Loess Plateau. A typical hill in the Loess Plateau was selected as our experimental site, and continuous soil moisture data were obtained using five monitoring instruments on the hillside. The rainfall was monitored simultaneously to investigate the soil moisture changes at varying depths under the influence of varying rainfall events. The soil moisture of five sample strips (including 31 sampling points) was measured using the ground-drilling sampling method, and the sampling was conducted before and after the rainy season to investigate the spatial variation of soil moisture at varying depths. The results show that soil moisture above a 20 cm depth fluctuated frequently under the influence of rainfall-evaporation and had no obvious regularity, making it challenging to characterize soil moisture differences for various land-use types or spatial locations. Therefore, the surface soil moisture should be used cautiously when studying soil moisture change characteristics. At a depth of 40−80 cm, rainfall less than 30 mm will not cause significant soil moisture changes. For different land-use types, the order of soil water content in farmland>grassland>shrubland could remain unchanged for long without heavy rainfall. At a depth of 100 cm, the soil moisture at each sampling point could be maintained at a stable value for several months. Rainfall less than 46 mm will not cause significant soil moisture changes in this layer. After heavy rainfall (>46 mm), the soil moisture will rise stepwise, and maintain long-term stability at the new level. In space, where the soil water content is higher, it remains high after the rainy season, whereas where the soil water content is lower before the rainy season, it remains low after the rainy season. The deeper into the soil, the more stable the spatial stability of soil moisture. Therefore, when comparing soil moisture of different land-use types or spatial locations using the ground-sampling method, deep sampling is critical to obtain stable and reliable results. This study’s results have practical value in simplifying soil moisture ground monitoring and rationally arranging sampling time nodes and have a reference value for soil moisture temporal and spatial prediction in the Loess Plateau.

Key words: soil moisture; stability; precipitation; Loess Plateau